

EFICÁCIA DE FIBRAS DISCRETAS DE AÇO NO REFORÇO À FLEXÃO DE ELEMENTOS DE BETÃO



Joaquim A. O. BARROS
Prof. Auxiliar
Dep. Eng^a Civil
Escola de Eng^a
Universidade do Minho
Guimarães



J. Alexandre B. Antunes
Aluno de Mestrado
Dep. Eng^a Civil
Escola de Eng^a
Universidade do Minho
Guimarães



José A.S.B.A. Amorim
Aluno de Mestrado
Dep. Eng^a Civil
Escola de Eng^a
Universidade do Minho
Guimarães

SUMÁRIO

Com base em ensaios experimentais efectuados segundo a mais recente proposta da RILEM, foi avaliada a eficácia, no reforço à flexão, proporcionada pela adição de fibras de aço ao betão. O número e a distribuição das fibras na secção de fractura dos provetes foram determinados, por forma a ser possível justificar os resultados obtidos. Utilizando um modelo numérico que simula o comportamento não linear dos materiais intervenientes, o reforço introduzido por fibras discretas foi comparado com o reforço obtido por uma armadura convencional (fictícia) de área igual à das fibras existentes na secção de fractura, por forma a estimar, de forma indirecta, a influência do comprimento, orientação e aderência das fibras.

1. INTRODUÇÃO

A capacidade de absorção de energia é a propriedade mais beneficiada pela adição de fibras a materiais de matriz cimentícia [1]. Neste sentido, a RILEM [2] propôs recentemente uma metodologia de ensaio de flexão para o betão reforçado com fibras de aço (BRFA), assim como parâmetros que pretendem caracterizar a ductilidade deste material. Nesse trabalho foram propostos dois parâmetros, designados de resistência equivalente dois e três ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$), ambos a serem utilizados na simulação do comportamento à tracção do BRFA fendilhado, o primeiro nas verificações aos estados limites de utilização e o segundo nas verificações aos estados limites últimos [3]. Com o objectivo de contribuir para a caracterização do BRFA, segundo as recomendações daquele organismo, foram efectuadas campanhas de ensaios experimentais,

num total de 108 provetes, e investigação numérica, com o objectivo de avaliar a influência, em $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$, da quantidade de fibras (Qf), da percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes (Cv) e da idade (Id) do BRFA à data do ensaio. A influência do número de fibras e sua distribuição na superfície de fractura, na resposta deformacional dos provetes, foi também analisada. Conhecida esta informação, e utilizando um modelo numérico que simula o comportamento não linear dos materiais intervenientes [4], foi possível, de forma indirecta, avaliar a eficácia do reforço das fibras no comportamento à flexão dos provetes ensaiados.

2. CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO SEGUNDO A RILEM

2.1 Introdução

Com os dois trabalhos publicados [2, 3], a RILEM pretende normalizar toda a envolvente associada à caracterização do comportamento em flexão do BRFA, desde as características do provete até às especificidades do equipamento de ensaio e de aquisição de resultados, tendo mesmo proposto determinados parâmetros que podem ser utilizados nos modelos de dimensionamento de estruturas de BRFA.

2.2 Resultados a determinar

Na Figura 1 está representada a típica relação força-flecha que se obtém no ensaio de flexão. Partindo desta relação avalia-se a carga correspondente ao limite de proporcionalidade (F_L), que consiste na máxima força registada até uma flecha (δ_L) de 0.05 mm, e determinam-se dois parâmetros, designados de resistência equivalente em flexão ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$), que pretendem caracterizar o comportamento do material até determinada flecha.

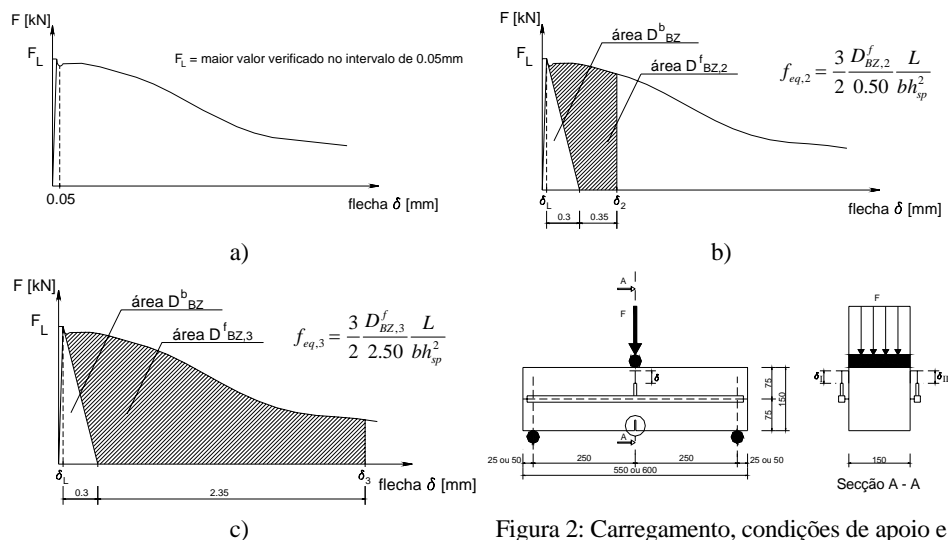


Figura 1a,b,c: Típica relação força-flecha.

Figura 2: Carregamento, condições de apoio e sistema de leitura segundo a RILEM.

Pode-se ainda traçar a relação entre a abertura de fenda e a flecha, e a relação entre a tensão e a abertura de fenda, esta última de primordial importância na calibração de modelos de simulação numérica do comportamento do BRFA, baseados na mecânica da fractura [5]. Os parâmetros $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ estão relacionados com a capacidade de absorção de energia $D_{BZ,2}$ ($D_{BZ,3}$), a qual é igual à área sob a curva carga-flecha até à flecha de δ_2 (δ_3), e é constituída por duas partes, uma correspondente à contribuição do betão simples, D_{BZ}^b , e outra à das fibras, $D_{BZ,2}^f$ ($D_{BZ,3}^f$), ver Figura 1. Nesta figura incluem-se as expressões que permitem determinar $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ em que h_{sp} (=125 mm) e b (=150 mm) são a altura e a largura da secção de fractura, respectivamente, e L (=500 mm) é o vão do provete (ver Figura 2). Apesar de terem sido registados os deslocamentos δ_I e δ_{II} , os deslocamentos referidos no presente trabalho são apenas os correspondentes a δ_I , na sequência das recomendações que serão publicadas em Junho de 2002, na revista da RILEM.

3. COMPOSIÇÕES

Para este estudo foram utilizadas fibras com a designação comercial DRAMIX® RC-80/60-BN [6]. Nesta designação o valor 60 corresponde ao comprimento da fibra ($l_f = 60$ mm) e o valor 80 à sua esbelteza (l_f/d_f), em que d_f é o diâmetro da fibra. A tensão de cedência do aço destas fibras é de aproximadamente 1100 MPa. Nas aplicações em pavimentos de edifícios industriais a quantidade deste tipo de fibras, geralmente empregue, encontra-se no intervalo de 10 a 30 kg/m³. Por este facto, as composições estudadas incluíram 0, 10, 20 e 30 kg/m³ de fibras. Na investigação efectuada foram estudadas composições com 0 %, 12.5 % e 25 % de substituição de cimento por Cv. Com base num modelo descrito em outro trabalho [7], obtiveram-se as composições apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Composições típicas dos BRFA produzidos.

Componente	kg/m ³		
Cimento I 42.5R	300	262.5	225
Cinzas Volantes	0 (0%)	37.5 (12.5%)	75 (25%)
Areia Fina	173.5	165.5	152.3
Areia britada	871.0	875.5	869.1
Brita 5/15	315.7	319.1	319.1
Brita 15/25	468.2	470.6	467
Água	163.8	158.8	153.8
Rheobuild® 1000	7.5		
Fibras Dramix® 80/60-BN	0 (0%); 10 (0.12%); 20 (0.25%); 30 (0.38%)		

Designação: FwQfjCvjIdk – w - tipo fibra; j - quantidade fibras (kg/m³); i - quantidade cinzas volantes (%); k - idade (dias)

4. INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE FIBRAS NA SECÇÃO DE FRACTURA

4.1 – Distribuição das fibras na secção de fractura

A Figura 3 representa a secção de fractura (acima do entalhe) de um provete. Para determinar o número e a distribuição das fibras, esta secção foi discretizada numa matriz de células, permitindo avaliar a distribuição, quer na direcção da betonagem, quer na direcção do

carregamento. Nos Quadros 2 a 4 representa-se a distribuição de fibras nos provetes reforçados com 10, 20 e 30 kg/m³ de fibras.

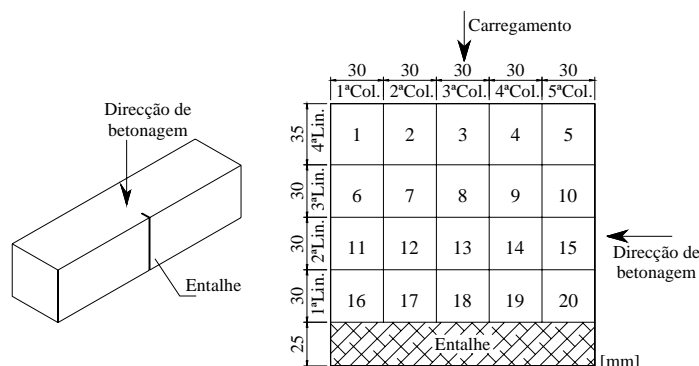


Figura 3: Secção de fractura discretizada em células.

Quadro 2: Distribuição média das fibras nos provetes reforçados com 10 kg/m³ de fibras.

	Célula (1ª col.)	N.º fibras	Célula (2ª col.)	N.º fibras	Célula (3ª col.)	N.º fibras	Célula (4ª col.)	N.º fibras	Célula (5ª col.)	N.º fibras	Total de fibras	% de fibras
(4ª lin.)	1.	1	2.	1	3.	1	4.	0	5.	1	4	21.1
(3ª lin.)	6.	1	7.	1	8.	1	9.	1	10.	1	5	26.3
(2ª lin.)	11.	2	12.	1	13.	1	14.	1	15.	1	6	31.6
(1ª lin.)	16.	1	17.	1	18.	1	19.	1	20.	0	4	21.1
Total de fibras		5		4		4		3		3	19	
% de fibras		26.3		21.1		21.1		15.8		15.8		

Quadro 3: Distribuição média das fibras nos provetes reforçados com 20 kg/m³ de fibras.

	Célula (1ª col.)	N.º fibras	Célula (2ª col.)	N.º fibras	Célula (3ª col.)	N.º fibras	Célula (4ª col.)	N.º fibras	Célula (5ª col.)	N.º fibras	Total de fibras	% de fibras
(4ª lin.)	1.	3	2.	3	3.	2	4.	2	5.	2	12	29.3
(3ª lin.)	6.	2	7.	3	8.	2	9.	1	10.	1	9	22.0
(2ª lin.)	11.	3	12.	3	13.	2	14.	1	15.	1	10	24.4
(1ª lin.)	16.	3	17.	2	18.	2	19.	2	20.	1	10	24.4
Total de fibras		11		11		8		6		5	41	
% de fibras		26.8		26.8		19.5		14.6		12.2		

Quadro 4: Distribuição média das fibras nos provetes reforçados com 30 kg/m³ de fibras.

	Célula (1ª col.)	N.º fibras	Célula (2ª col.)	N.º fibras	Célula (3ª col.)	N.º fibras	Célula (4ª col.)	N.º fibras	Célula (5ª col.)	N.º fibras	Total de fibras	% de fibras
(4ª lin.)	1.	5	2.	4	3.	4	4.	3	5.	1	17	23.3
(3ª lin.)	6.	6	7.	5	8.	5	9.	3	10.	2	21	28.8
(2ª lin.)	11.	5	12.	5	13.	3	14.	3	15.	2	18	24.7
(1ª lin.)	16.	5	17.	4	18.	4	19.	2	20.	2	17	23.3
Total de fibras		21		18		16		11		7	73	
% de fibras		28.8		24.7		21.9		15.1		9.6		

Os resultados incluídos em cada um destes quadros são a média do número de fibras determinado nos provetes com diferente idade e diferente percentagem de Cv. Cada valor destes quadros resulta da média de 27 medidas. Da análise dos valores incluídos nestes quadros constata-se que a percentagem de fibras cresce no sentido da betonagem, registando-se o maior valor na 1ª coluna (ver Figura 3), i.e., na face oposta à de betonagem, revelando ter havido alguma segregação, motivada pelo processo de aplicação do betão.

4.2 – Trabalhabilidade

A trabalhabilidade da mistura, determinada através do ensaio de abaixamento (slump), pode ser tido como um indicador da segregação das fibras. Da análise dos resultados obtidos nos ensaios efectuados [8], verificou-se que uma maior percentagem de fibras na coluna correspondente à face contrária à de betonagem, corresponde também a um maior valor do slump. Dado que o carregamento actua numa direcção ortogonal à da betonagem, esta concentração de fibras não beneficia o comportamento do provete em termos de ductilidade, promovendo um reforço não homogéneo em relação ao eixo do provete.

4.3 – Relações força-flecha

Nas Figuras 4 a 6 apresentam-se as relações força-flecha obtidas nos provetes com 7, 28 e 90 dias, respectivamente (cada curva é a resposta média observada em três provetes).

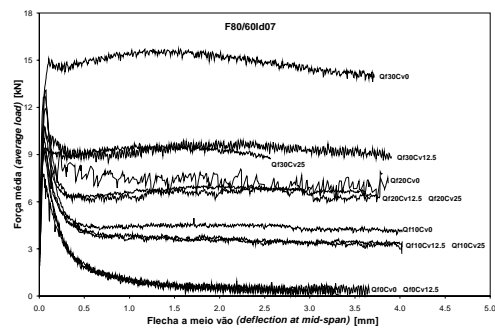


Figura 4: Provetes com 7 dias.

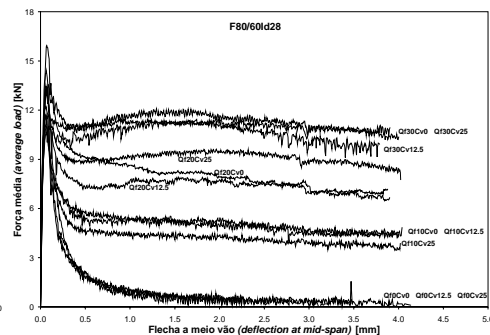


Figura 5: Provetes com 28 dias.

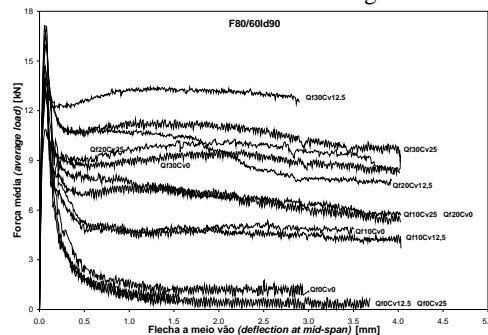


Figura 6: Provetes com 90 dias.

Da análise destas curvas verifica-se que o aumento da ductilidade com o incremento da quantidade de fibras é muito mais significativo que o aumento da carga de pico, sendo isto tão mais significativo quanto menor a idade do provete. Aos 7 dias, a ductilidade dos provetes com 12.5% de Cv é muito semelhante à dos provetes com 25% de Cv. Aos 28 dias, a ductilidade dos provetes reforçados com 30 kg/m³ de fibras é similar para qualquer percentagem de Cv. O mesmo ocorre nos provetes reforçados com 10 kg/m³ de fibras. A maior ductilidade registou-se nos provetes sem Cv. Comparando as respostas registadas nos provetes reforçados com 30 kg/m³ de fibras, verifica-se que a resposta mais dúctil ocorre nos provetes Qf30Cv0, com sete dias, o que não sendo o esperado, é justificado pelo maior número de fibras medido na secção de fractura destes provetes [8]. Durante a fase de amolecimento, alguns provetes revelam uma espécie de endurecimento, justificável pelo maior número de fibras dispostas em determinadas camadas. Assim, a existência de uma percentagem elevada de fibras na 1ª camada (1ª Linha na Fig. 3) assegura uma menor queda de carga após o pico, de que é exemplo a série Qf30Cv12.5 aos 28 dias. Se a máxima percentagem de fibras ocorrer em camadas superiores, o “endurecimento” ocorrerá para flechas mais elevadas.

4.4 – Resistências equivalentes em flexão

Nas Figuras 7 a 12 representa-se a variação do valor médio de $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ com a quantidade de fibras, para as idades de 7, 28 e 90 dias. Da análise destes resultados verifica-se que para mesma idade e quantidade de fibras, $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ são semelhantes, revelando que durante a fase de amolecimento, e até uma flecha de 2.7 mm (δ_3), a tensão residual é mantida praticamente constante. O mesmo acontece com a evolução destes parâmetros com a quantidade de fibras, dado que se regista um aumento aproximadamente linear, excepto nos provetes com 7 dias de idade, sem cinzas volantes e para quantidade de fibras acima dos 20 kg/m³. Nestes últimos provetes o aumento de $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ foi mais significativo que nos restantes casos. Comparando os resultados obtidos aos 28 dias com os registados aos 7 dias conclui-se que os valores daquelas tensões são menos afectadas pela presença das cinzas volantes aos 28 dias, que aos 7 dias. Aos 90 dias constata-se que a partir dos 10 kg/m³ de fibras os provetes com 12,5% de Cv são os que apresentam maior ductilidade, sendo este comportamento tão mais significativo quanto maior a percentagem de fibras.

5. AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DO REFORÇO DAS FIBRAS

5.1 – Estratégia

Dado que as fibras são discretas, distribuem-se aleatoriamente, distribuição essa condicionada pela técnica de aplicação do BRFA, pelas dimensões do molde face ao comprimento da fibra e pelo modo de vibração. Tais aspectos, conjugados com as características geométricas das fibras, que lhes garantem determinadas condições de aderência e de fixação ao betão envolvente, conduzirá a uma eficácia diferente da proporcionada por uma armadura convencional, de área igual à área de uma determinada percentagem de fibras. Para simular este efeito são geralmente utilizados factores que atendem ao comprimento da fibra, à sua orientação, e às suas características geométricas [9], de forma a reduzir a tensão de tracção do BRFA fendilhado. Para avaliar, de forma indirecta, a eficácia de reforço de determinada distribuição de fibras, foi utilizado um modelo numérico que permite traçar a relação momento-curvatura para uma secção

qualquer, discretizada em camadas. Tendo por base as leis que simulam o comportamento não linear dos materiais que constituem a secção [4] e assumindo que o provete é constituído por três tramos com comportamento distinto, dois tramos laterais com comportamento linear e elástico, ligados por um tramo, no centro do provete, onde se processa os mecanismos de não linearidade material, é possível obter a relação momento-curvatura [9].

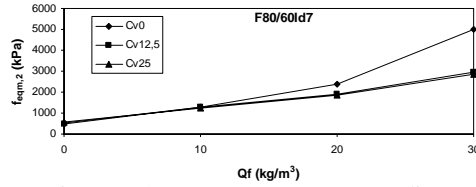


Figura 7: $f_{eq,2}$ - Q_f em provetes com 7 dias.

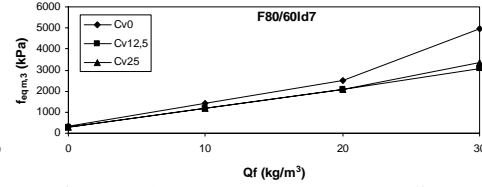


Figura 8: $f_{eq,3}$ - Q_f em provetes com 7 dias.

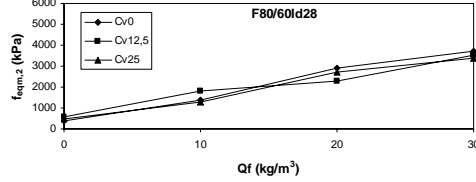


Figura 9: $f_{eq,2}$ - Q_f em provetes com 28 dias.

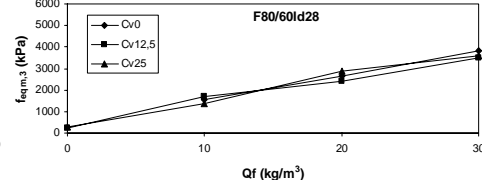


Figura 10: $f_{eq,3}$ - Q_f em provetes com 28 dias.

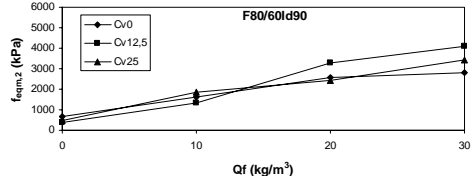


Figura 11: $f_{eq,2}$ - Q_f em provetes com 90 dias.

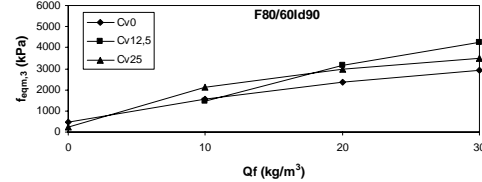


Figura 12: $f_{eq,3}$ - Q_f em provetes com 90 dias.

Na simulação numérica, a secção de fractura foi discretizada em 20 camadas de betão e 4 faixas de armadura convencional. Estas armaduras foram dispostas a meio das camadas utilizadas na avaliação do número e distribuição das fibras na secção de fractura (ver Figuras 3 e 13), e têm uma secção transversal igual à área da secção das fibras posicionadas na respectiva camada. Assim, um determinado provete de BRFA é idealizado como um provete de betão simples reforçado com 4 camadas de armadura convencional. No modelo numérico admitiu-se que esta armadura convencional tinha um módulo de elasticidade de 200 GPa, um comportamento linear-elástico até aos 1100 MPa (tensão de rotura das fibras), seguido de um comportamento perfeitamente plástico. Quanto às propriedades do betão à compressão, consideraram-se as registadas nos ensaios experimentais [8], tendo o valor da resistência à tracção uniaxial (f_{cm}) sido determinado segundo a recomendação do REBAPE. Como a energia de fractura, G_f , a forma da lei de amolecimento e a largura da banda de fendilhação, l_b , [1] não foram determinados directamente, a sua avaliação foi efectuada simulando-se numericamente os ensaios de flexão realizados com provetes de betão simples (ver Figura 13), tendo-se verificado que a extensão no ponto de quebra do diagrama bilinear de amolecimento é três vezes a extensão de fendilhação, com a correspondente tensão igual a 40% de f_{cm} , e com $g_f = G_f / l_b = 0.00267$ N/mm². Os valores destes parâmetros de fractura foram utilizados em todas as simulações numéricas, pelo que entre

estas apenas se fez variar os valores dos parâmetros que definem a lei de compressão do betão, a resistência à tracção uniaxial e a área de cada uma das faixas de armadura fictícia. Nas Figuras 14 a 17 representam-se os resultados obtidos numérica e experimentalmente nas séries de provetes reforçados com 10, 20 e 30 kg/m³ de fibras.

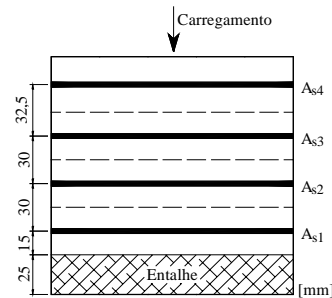


Figura 13: Disposição das armaduras convencionais fictícias.

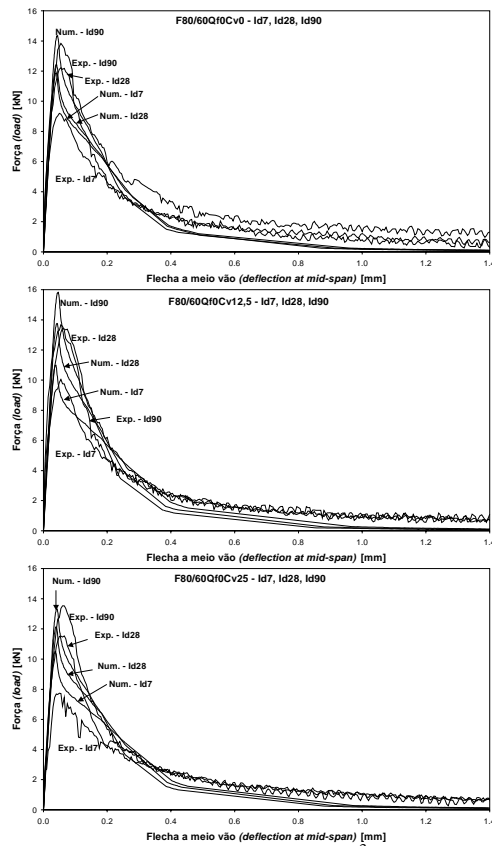


Figura 14: Provetes com 0 kg/m³ de fibras.

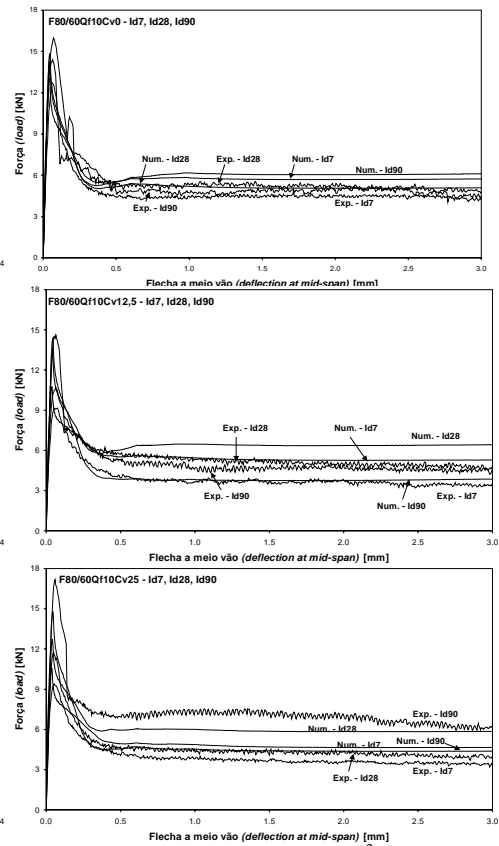


Figura 15: Provetes com 10 kg/m³ de fibras.

Da análise das curvas incluídas nestas Figuras constata-se que a eficácia do reforço das fibras diminui com o aumento da quantidade de fibras. Nas respostas numéricas verifica-se a ocorrência de uma queda de carga logo após o pico, dado que a primeira faixa de armadura está localizada 15 mm acima da boca do entalhe, e a percentagem de armadura fictícia é inferior à mínima. Nos provetes reforçados com 30 kg/m^3 de fibras, a queda observada nas respostas experimentais não foi tão acentuada como a obtida na simulação numérica, dado que nos provetes existe um número considerável de fibras logo acima da boca do entalhe.

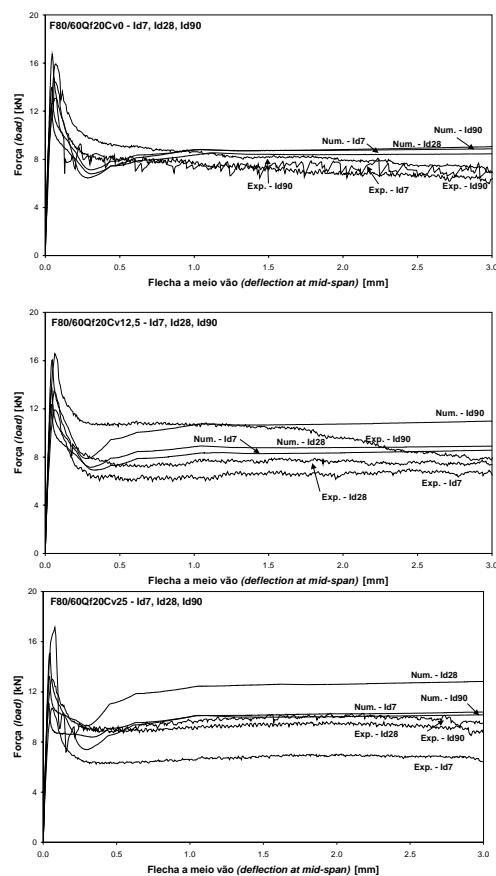


Figura 16 – Provetes com 20 kg/m^3 de fibras.

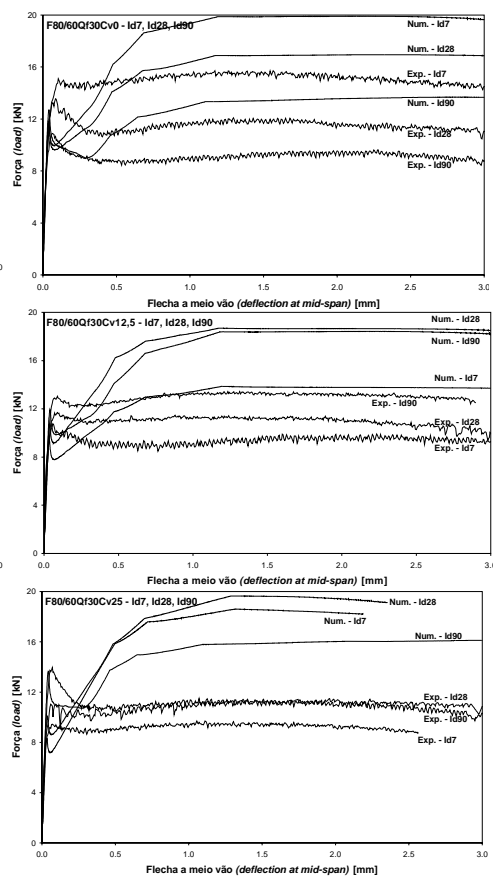


Figura 17 – Provetes com 30 kg/m^3 de fibras.

6. CONCLUSÕES

Da análise da relação entre o abaixamento do cone de Abrams e a distribuição de fibras na secção de fractura do provete verificou-se que a segregação das fibras aumenta com o abaixamento, ocorrendo uma concentração maior de fibras na face oposta à de betonagem. Dado que a caracterização do comportamento à flexão, segundo as recomendações do RILEM, é efectuada solicitando o provete na direcção ortogonal à de betonagem, o reforço proporcionado pelas fibras em provetes realizados com amassaduras de abaixamento elevado é bastante heterogéneo,

promovendo o desenvolvimento não uniforme de abertura de fenda na secção de fractura, o que se pode reflectir na estabilidade do ensaio e na resposta deformacional, pós-pico, do provete.

Da análise dos resultados obtidos nos ensaios de flexão constatou-se que $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ aumentam praticamente de forma linear com a quantidade de fibras, sendo os valores de $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ muito similares, o que indica que na fase pós-pico, estes compósitos desenvolvem uma resistência residual praticamente constante até à flecha de 2.7 mm.

Para avaliar a eficácia de reforço das fibras, o seu número e sua distribuição na secção de fractura dos provetes ensaiados foram determinados. Constatou-se que a amplitude da queda de carga, logo após a carga de pico, está relacionada com uma menor percentagem de fibras na zona acima à boca do entalhe, e que a ocorrência de aumento da tensão residual durante a fase de amolecimento está associada a concentração mais elevada de fibras em determinadas camadas da secção de fractura do provete. A distribuição das fibras foi convertida em armadura convencional, com propriedades materiais similares às das fibras. Recorrendo a um modelo numérico que simula o comportamento não linear material dos materiais intervenientes, obteve-se a relação força-flecha para os provetes ensaiados. Da comparação entre as respostas experimentais e numéricas constatou-se que a eficácia das fibras diminui com o aumento da quantidade de fibras aplicadas. Para 10 e 20 kg/m³, as fibras têm níveis de eficácia similares à de armaduras convencionais, mas para 30 kg/m³ a eficácia das fibras já é significativamente inferior.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento concedido pela FCT ao projecto “Cost competitive steel fibre reinforced concrete for industrial pavements”, com referência POCTI/34793/99, à Pisonort – pavimentos industriais, Lda, Secil e MBT, pelo fornecimento de todos os materiais utilizados na confecção dos betões e à Civitest pela colaboração prestada ao nível de equipamento de laboratório.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Barros, J.A.O. - Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica. Tese de Doutoramento, Dep. Eng^a Civil, FEUP, 1995.
- [2] RILEM TC 162 – TDF, “Test and design methods for steel fibre reinforced concrete”, *Materials and Structures*, Vol. 33, January-February 2000, p. 3-5.
- [3] RILEM TC 162 – TDF, “Test and design methods for steel fibre reinforced concrete”, *Materials and Structures*, Vol. 33, March 2000, p. 75-81.
- [4] Barros, J.A.O., Figueiras, J.A., “Flexural behavior of steel fiber reinforced concrete: testing and modelling”, *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, 1999, Vol. 11, Nº 4, p. 331-339.
- [5] Olesen, J.F., “Fictitious crack propagation in fiber-reinforced concrete beams”, *Journal of Engineering Mechanics*, March 2001, p. 272-280.
- [6] Dramix - *Product data sheet*. N.V.Bekaert S.A., 1998.
- [7] Barros, J.A.O. *et al.* - “Influência do tipo, percentagem e distribuição de fibras, idade do betão e quantidade de cinzas volantes no comportamento do betão reforçado com fibras de aço”, 4º Encontro Nacional de Análise Experimental de Tensões e Mecânica Experimental, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Bragança, de 17-19 de Outubro de 2001, p. 55.
- [8] Amorim, J.A.S.B.A. *et al.* - “Influência da quantidade de fibras, percentagem de cinzas volantes e idade no comportamento à flexão de betão reforçado com fibras de aço Dramix RC-80/60-BN”, Relatório 02-DEC/E-11, Depart. de Eng^a Civil, Escola de Eng^a, Universidade do Minho, 2002.
- [9] Lim, T.Y.; Paramasivam, P.; Lee, S.L., “Analytical model for tensile behavior of steel-fiber concrete”, *ACI Materials Journal*, July-August, 1987, p. 286-298.
- [10] Barros, J.A.O., Sena Cruz, J. “Fracture energy of steel fibre reinforced concrete”, *Journal of Mechanics of Composite Materials and Structures*, Vol. 8, No. 1, January-March 2001, p.29-45.